2024 年 第 24 卷 第 17 期
2024, 24(17): 07014-10

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306269
引用格式:李亭, 何美琪, 李少明, 等. 非常规油气开采压裂用减阻剂的研究现状及展望[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7014-7023.
Li Ting, He Meiqi, Li Shaoming, et al. Review of drag reducing agents for unconventional oil and gas exploitation and fracturing[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(17): 7014-7023.

石油、天然气工业

非常规油气开采压裂用减阻剂的研究现状及展望

李亭[1,2], 何美琪[1,2], 李少明[3], 吴清苗[1,2], 赵佳乐[1,2]
(1. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100; 2. 油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学), 武汉 430100;
3. 中石化江汉油田石油工程技术研究院, 武汉 430100)

摘 要 为降低压裂施工摩阻,提高非常规储层的压裂改造效果,在系统调研国内外关于压裂用减阻剂文献的基础上,综述了减阻剂的类型和减阻机理,分析了减阻性能的影响因素,介绍了减阻剂的现场应用情况和减阻剂主要存在的问题,并提出了减阻剂未来的发展方向。结果表明:目前常用的减阻剂主要存在成本高、性能不稳定、减阻机理不明确的问题;低成本、对储层伤害低、减阻性能高效的多功能型纳米复合减阻剂将是未来减阻剂研究的重点和热点。通过对减阻剂的全面研究,可为目前减阻剂性能的提升、新型减阻剂的研发和非常规油气的开采提供可行性的帮助。

关键词 压裂; 减阻剂; 减阻机理; 纳米复合; 综述
中图法分类号 TE357; **文献标志码** A

Review of Drag Reducing Agents for Unconventional Oil and Gas Exploitation and Fracturing

LI Ting[1,2], HE Mei-qi[1,2], LI Shao-ming[3], WU Qing-miao[1,2], ZHAO Jia-le[1,2]
(1. Petroleum Engineering College, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering (Yangtze University), Wuhan 430100, China;
3. Sinopec Jianghan Oilfield Petroleum Engineering Technology Research Institute, Wuhan 430100, China)

[**Abstract**] In order to reduce the friction of fracturing construction and improve the effect of unconventional reservoir fracturing, based on the systematic investigation of domestic and foreign literatures on drag reducing agents used in fracturing, the types and mechanism of drag reducing agents were reviewed, the influencing factors of drag reducing performance were analyzed, the field application of drag reducing agents and the main existing problems of drag reducing agents were introduced, and the future development direction of drag reducing agents was proposed. The results show that the main problems of the current commonly have problems such as high cost, unstable performance, and unclear drag reduction mechanisms. The multi-functional nano-composite drag reducer with low cost, low damage to reservoir and high drag reduction performance will be the focus and hot spot in the future research of drag reduction agents. Through the comprehensive study of drag reducing agents, it can provide feasible help for improving the performance of current drag reducing agents, the research and development of new drag reducing agents and the exploitation of unconventional oil and gas.
[**Keywords**] fracturing; drag reducer; drag reduction mechanism; nanocomposite; review

随着传统油气资源逐渐趋于枯竭和能源需求不断增长,油气自主供应能力不足和对外依赖程度较高的问题严重威胁着中国能源安全,为了提供稳定的能源基础,有效保障国家能源供应,加大非常规油气资源的勘探开发力度显得尤为重要[1-3]。由于非常规油气资源储层普遍具有低渗透性和低孔隙度的特点,使得它的开发难度大大增加,为了提高开采效率,达到经济开发的目的,需要通过水力压裂的技术手段来对非常规油气储层进行储层改造[4-5]。

滑溜水压裂液是目前在非常规油气开发中被广泛应用的一种新型压裂液体系,由于其黏度较低、携砂能力差等问题的存在,在进行压裂工作时需要增大压裂液的排量,这增加了压裂液和管道之

收稿日期: 2023-08-14; **修订日期**: 2024-03-15
基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05060)
第一作者: 李亭(1978—),男,汉族,山东曹县人,博士,副教授。研究方向:油气储层增产改造技术。E-mail:3426896687@qq.com。

间的阻力,同时也使得施工成本大幅提升[6-8]。减阻剂作为滑溜水压裂液体系中的核心添加剂,可以降低施工摩阻,缓解施工压力和节约施工成本,它的综合性能直接影响着压裂效率的高低,因此有必要对滑溜水压裂液用减阻剂展开比较全面的研究[9-12]。现对减阻剂类型、减阻剂的减阻机理进行介绍,分析不同因素对减阻性能的影响,列举减阻剂在非常规油气开发中的现场应用情况,归纳总结减阻剂目前存在的主要问题,并相应地对减阻剂未来的发展方向进行展望,以期为新型压裂用减阻剂的研发和提高非常规油气的采收率提供一定的理论指导和技术支撑。

1　减阻剂类型

1.1　聚合物类减阻剂

聚合物减阻剂在压裂施工中应用较广,不同的聚合物减阻剂对应的优缺点也有很大差别,主要从天然聚合物减阻剂和人工合成聚合物减阻剂这两方面来对聚合物类减阻剂进行介绍。表 1 为常用的聚合物类减阻剂的性能对比。

表 1　常用聚合物类减阻剂性能对比

Table 1　Comparison of properties of commonly used polymer drag reducers

减阻剂类型	减阻剂	优点	缺点
天然聚合物	胍胶、黄原胶	来源丰富,容易降解,环境友好	不溶性物质含量高,对低孔低渗储层伤害较大
人工合成聚合物减阻剂	聚丙烯酰胺	具有良好的热稳定性和减阻性能	耐盐性、抗剪切性较差

1.1.1　天然聚合物减阻剂

天然聚合物减阻剂具有来源丰富、容易降解等特点,胍胶是早期被广泛应用的一种天然聚合物减阻剂。在对胍胶减阻性能的研究中,Sharma 等[13]利用返排水配制的胍胶和破乳剂等化学添加剂组成的复合体系在现场压裂施工中,减阻率达到了 63.7%。张春雨等[14]通过 FENE-P 模型进行模拟并结合实验进一步发现,胍胶的减阻性能达到最优状态时对应的浓度区间为 1 000 ~ 3 000 mg/L。

Mohammadtabar 等[15]研究了黄原胶的耐剪切能力,研究发现属于刚性聚合物的黄原胶相对于属于柔性聚合物的聚丙烯酰胺来说,耐剪切能力更强。Hong 等[16]研究了矿化度对黄原胶减阻性能的影响,研究结果表明,黄原胶的减阻性能受到矿化度的影响较大,当 KCl 的浓度逐渐增大时,黄原胶对应的减阻率会逐渐降低,分析认为这是由于黄原胶分子链的刚性随着离子浓度的增大而变强,进而使得黄原胶的减阻率降低。禹燕飞等[17]通过实验评价了黄原胶水溶液浓度对减阻率的影响,实验结果表明当浓度逐渐增大时,减阻率也相应增大,但当浓度增大到一定值时,此后减阻率并不会随着浓度的继续增大而增大,而是基本保持稳定的状态。

虽然胍胶和黄原胶都有一定的减阻性能,但是这两者的水不溶物含量都比较高,这使得在低孔低渗储层使用这两种减阻剂会导致较大的伤害性,此外在低浓度情况下,胍胶和黄原胶的减阻效果并不显著,因此胍胶和黄原胶在滑溜水压裂液中的应用受到了一定限制。目前阶段,这两种聚合物一般更倾向于应用在稠化剂领域[18]。

1.1.2　人工合成聚合物减阻剂

相比于胍胶和黄原胶这些天然聚合物减阻剂来说,传统的人工合成聚合物减阻剂在减阻性能上有一定的提升,但它们在高温、高盐和强剪切这些复杂的压裂环境下耐久性较差,容易失去减阻效果。为了有效改善这些问题,避免在现场应用时受到限制,许多研究人员开始致力于合成性能更加优异的聚合物减阻剂,以适应各种复杂压裂环境的需要。

安杰等[19]研究思路为通过含有多个支链结构的聚合物来接枝一些功能性单体进而合成了减阻剂 DR64,其中磺酸基团的存在能够有效提高减阻剂的耐盐性。李楚航等[20]合成了一种缔合聚合物 MRFF 减阻剂,该减阻剂减阻性能良好,且具有较强的耐盐性,质量分数为 0.8% 的 MRFF 减阻剂,在流速为 14 m/s 的标准盐水中,减阻率超过了 60%,另外随着流速的增加,减阻剂的减阻率呈先增大后趋于稳定的变化趋势。成育红等[21]为了有效提高致密砂岩储层的压裂施工效果,合成了一种具有良好减阻性能和耐盐性能的聚合物减阻剂 P-FMA,这种减阻剂对储层的伤害性也较小,另外,通过进一步实验研究发现,在温度为 30 ℃时,随着排量的增大,减阻剂对应的减阻率也在相应增大。崔强等[22]通过水溶液聚合法制备得到一种减阻剂 FHAPAM,减阻剂的减阻性能优异,在质量分数为 0.12% 时最大减阻率达到了 75.5%,同时通过流变性能评价实验发现该减阻剂也具备很强的耐温耐盐性。

针对一些减阻剂存在耐温、耐盐、抗剪切性不足以及对目标储层的伤害性较大的问题,一些研究人员通过反相乳液聚合方法合成的减阻剂也能有效提升这些性能不足的方面。

Liu 等[23]利用反相乳液共聚法合成的减阻剂

QIE-0 减阻性能优异,在超低浓度 0.01% 时的减阻率就能够达到 82.1%,另外这种减阻剂具有很强的热稳定性,耐温达到了 220 ℃。刘晓瑞等[24]通过反相乳液聚合法合成了一种减阻剂,这种减阻剂质量分数为 0.1% 时,在 50% 的标准盐水溶液中减阻率超过了 70%,同时对减阻剂进行了耐剪切性能测试,在 170 s^{-1}的情况下剪切 1 h,减阻剂的表面黏度保持在 50 mPa·s 以上,体现出了良好的耐剪切性。杨旭等[25]借助丙烯醇、十六烷基叔胺和环氧氯丙烷为功能单体,通过反相乳液聚合的方法合成减阻剂 GnR-1,经过实验测试发现,这种减阻剂在质量浓度为 10 g/L 的 $NaCl_2$溶液中,减阻率可以保持在 60%。吴越[26]通过反相乳液聚合的方法合成的高分子聚合物减阻剂配伍性达到了页岩气压裂现场施工的要求,并且减阻性能优异,在添加量为 0.05% 时,该减阻剂的减阻率达到了 70%。

1.2 表面活性剂类减阻剂

表面活性剂类减阻剂相对于聚合物类减阻剂来说耐剪切性能更好,但是其浓度需要达到远超临界胶束浓度的标准才能有效发挥减阻作用,因此成本相对较高。目前表面活性剂类减阻剂主要可以分为阳离子型表面活性剂如十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)、阴离子型表面活性剂如十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、非离子型表面活性剂如油酸二甲基氧化胺(ODMAO)以及两性离子型表面活性剂如十二烷基甲基氧化铵(OA-12)这几种类型。表 2 总结和对比了部分表面活性剂减阻剂的性能。

李恩田等[31]研究了雷诺数对十二烷基二甲基氧化胺(OA-12)减阻率的影响,发现随着雷诺数的逐渐增加,OA-12 的减阻率相应地也逐渐增大,并在雷诺数增大到 20 000 时达到最大,随着雷诺数的继续增大,对应的减阻率快速减小,最后基本保持不变。Tamano 等[32]以毒性较低的十二烷基二甲基氧化胺为主要成分合成了一种减阻剂,并通过实验研究了减阻剂质量分数和减阻率之间的对应关系,研究发现减阻剂质量分数为 0.6% 时对应的减阻率最大,最大值为 70%。

表 2 部分表面活性剂减阻剂的性能对比

Table 2 Comparison of properties of some surfactant drag reducers

减阻剂类型	减阻剂	特性	来源文献
阳离子型表面活性剂	十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)	减阻性能优异,毒性较高,对储层污染性较大	[27]
阴离子型表面活性剂	十二烷基硫酸钠(AS)	减阻效果良好,耐盐性能不足,应用受限	[28]
两性离子型表面活性剂	三甲胺油酸酰亚胺(ZA)	具有一定的生物降解能力,毒性相对较低,种类不多	[29]
非离子型表面活性剂	油酸二甲基氧化胺(ODMAO)	生物毒性低,易降解,提高聚合物减阻剂的耐盐性,价格高,应用受限	[30]

1.3 表面活性剂/聚合物复配减阻体系

表面活性剂类减阻剂和聚合物类减阻剂有不同的优势和劣势,将表面活性剂类减阻剂和聚合物类减阻剂复配从而实现优势互补,两者之间相互作用形成一种超分子结构,提高聚合物分子链的伸展程度,这样协同减阻可以获得更加高效稳定的减阻效果,成为当下一种新的压裂液减阻体系的研究思路。

袁颖等[33]对由阳离子型表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)、反离子盐水杨酸钠(NaSal)和阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)组成的复配体系进行研究,分析了阳离子型表面活性剂 CTAC 浓度对复配体系减阻性能的影响,发现该复配体系的减阻率随着 CTAC 浓度的增加呈现先增大后减小的变化趋势,减阻率达到最大值时对应的 CTAC/NaSal 浓度为 0.3 g/L。王青会等[34]用阳离子型表面活性剂 CTAC、水杨酸钠 NaSal、非离子型聚丙烯酰胺(PAM)组成的混合溶液进行实验,实验发现当雷诺数超过临界雷诺数时,混合溶液在减阻破坏区的减阻性能相对纯 CTAC 溶液更好,且随着非离子型聚丙烯酰胺浓度的增加,混合溶液对应的减阻率也随之增大。Liu 等[35]通过实验对比了非离子型聚丙烯酰胺(PAM)单独作用时和混合十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)后的减阻率,实验结果表明在雷诺数为 28 000 和温度为 35 ℃时,单独的 60 mg/L 非离子型聚合物 PAM 对应的减阻率是 50%,而 60 mg/L 的非离子型聚合物 PAM 混合 100 mg/L 的 CTAC 后,混合溶液对应的减阻率增大到了 70%。

1.4 纳米复合减阻剂

纳米材料具有独特的物理特性和化学特性,在钻井液、完井液、油田污水处理等领域都展现出了很好的应用效果,因此有一些学者将纳米材料的应用拓展到滑溜水压裂液体系中,研究了单独的纳米材料以及和传统高分子聚合物进行复合形成纳米复合减阻剂在减阻方面的作用。

Esfandiari 等[36]研发出一种疏水性复合纳米 TiO_2颗粒,这种纳米颗粒具有磁性,能够受到外界磁场的控制,减阻率的大小达到了 12%。余维初等[37]自主研发了一种纳米复合减阻剂 JHFR-2,该减阻剂耐温耐盐性能良好,并且对储层污染程度很

小,在应用于现场压裂施工中减阻率达到了 68%,具有良好的减阻效果。Pakzad 等[38]通过成本相对较低的聚二甲基硅氧烷对纳米 SiO_2 进行包覆处理,减阻率最高达到了 24.6%。

另外,一些纳米颗粒存在耐温和耐盐性能不足的问题,有研究人员也针对性地进行了改善。秦文龙等[39]通过丙烯酰胺/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AM/AMPS)接枝纳米 Fe_3O_4,制备出一种新型减阻剂,其中 AMPS 中含有磺酸基团,使得减阻剂对盐的敏感性不高,表现出了良好的耐盐性能,在 NaCl 的质量分数为 10% 时,这种减阻剂的黏度保持率大约为 70%。

纳米复合减阻剂集中了纳米材料和高分子聚合物的优点并对缺点有所弥补,同时两者协同发挥减阻作用,具有稳定性高、耐温耐盐性强和对储层伤害较低等特点,是未来减阻剂重点研发的方向。如果能有效降低纳米材料的制备成本,它将具备非常广阔的应用前景。

2　减阻剂的减阻机理

2.1　聚合物减阻剂的减阻机理

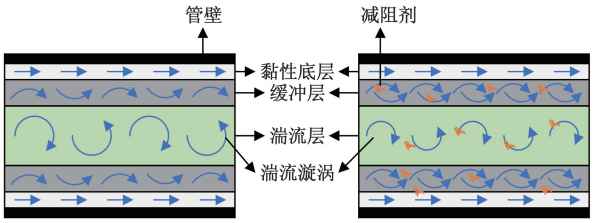
减阻机理一直是减阻剂领域的研究热点,国内外众多学者都对其展开了深入讨论和研究。由于减阻剂的减阻机理十分复杂,涵盖了多个学科领域,因此很多关于减阻机理解释的学说都存在一定的局限性,目前普遍被大家认可的对聚合物减阻机理的解释主要是黏弹说和湍流脉动抑制学说这两种[40]。

2.1.1　湍流脉动抑制说

在管道中,滑溜水压裂液有两种流动方式,一种是层流,一种是湍流,值得注意的是,在压裂液低速流动呈现为层流状态的情况下,减阻剂并不会产生明显的减阻作用,而当滑溜水压裂液流动状态为湍流时,由于此时会有很多漩涡产生,在漩涡和管壁以及漩涡彼此之间会发生能量传递的行为,能量传递的过程中不可避免地会损失一些能量,损失的这一部分能量就会相应转化成阻力[1]。聚合物减阻剂的加入可以在很大程度上减弱湍流漩涡的产生,抑制湍流脉动,同时改变湍流状态时漩涡的形态结构,进而使得阻力减小,有减阻剂加入和无减阻剂加入时对应的湍流状态如图 1 所示[41]。

2.1.2　黏弹说

在较高浓度下,聚合物减阻剂通常都表现出一定程度的黏性和弹性,关于聚合物能够产生减阻作用的关键是黏性还是弹性,不同的研究人员提出了不同的看法。Liu 等[42]认为在低流速状态下,减阻



(a) 无减阻剂时对应的湍流状态　(b) 有减阻剂时对应的湍流状态

图 1　减阻剂抑制湍流脉动示意图[41]

Fig. 1　Schematic diagram of turbulence pulsation inhibition by drag reducer[41]

剂的减阻性能主要受到聚合物黏性的影响,而在高流速状态下,减阻剂的减阻性能则主要受到聚合物弹性的影响。刘青山等[30]研究认为聚合物在湍流缓冲层中被拉伸进而发生了形变,在缓冲层中应变速率和涡度场的作用下聚合物完全延伸,这使得聚合物的有效黏度大幅增加,有效抑制了漩涡的发展从而达到了减阻效果。

也有学者认为相较于有效黏度的增加,弹性才是聚合物能够发挥减阻作用的关键因素。湍流是一种多尺度现象,具有广泛的空间尺度,在湍流高应力区,具有黏弹性结构的聚合物吸收了湍流中漩涡因能量传递行为而损失的部分能量,并将这部分能量转化成了弹性能的形式储存在自身空间结构中,当聚合物进入低应力区后,储存的这部分弹性能释放出来降低涡流能量损耗,改变湍流结构,最终有效减小阻力[43-44]。聚合物的黏弹性减阻机理示意图如图 2 所示[45]。

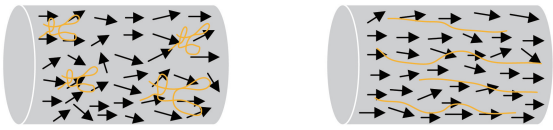

(a) 聚合物吸收湍流漩涡能量示意图　(b) 聚合物释放弹性能示意图

图 2　聚合物黏弹性减阻机理示意图[45]

Fig. 2　Schematic diagram of viscoelastic drag reduction mechanism of polymer[45]

3　影响减阻性能的因素

减阻剂的减阻性能受多方面因素影响,在现场应用减阻剂时,为确保能够最大程度地发挥减阻剂的减阻作用,有必要展开对减阻性能产生影响的一些主要因素的研究。

3.1　减阻剂浓度对减阻性能的影响

徐婷婷等[46]以水溶性疏水单体合成了一种减阻剂 P(AM-DM16),并且研究了该减阻剂的浓度和减阻率之间的关系,在流速一定(10 m/s)的情况下,当减阻剂浓度从 0.01% 上升到 0.06% 时,减阻

剂对应的减阻率从54%上升到了67%。杨霖等[47]研究了减阻剂HPAM-L减阻率受浓度的影响,研究发现该减阻剂的减阻率并不是随着浓度的增加无限增大,而是先增大到一定值然后趋于稳定的状态,其中在加量浓度为0.1%时,减阻剂对应的减阻效果最好。分析认为,浓度的增加使得体系黏度增大,逐渐形成了弹性底层,这使得减阻剂的初始减阻效果得到了提升。Jing等[48]研究了浓度对疏水缔合型聚丙烯酰胺减阻剂AM-DHAB减阻率大小的影响,研究发现随着减阻剂浓度的增加,减阻率一开始会相应增大,增大到一个值后减阻率不会随着浓度的增加而继续增大,反而是会随着浓度的继续增大相应地减小,在浓度为0.3%时,减阻率达到最大值,约为70%。

当浓度超过一定值后减阻效果下降,这是因为此时表观黏度增大得很明显,这也使得流动阻力增大很明显,因此减阻效果会出现变差的情况。

3.2 剪切(速率、时间)对减阻性能的影响

研究人员对剪切对减阻性能产生影响的微观机理展开了研究。Liu等[49]通过减阻剂溶液在不同流速剪切流作用下的纳米粒度分布、流变特性和透射电镜观察到的微观结构,证实了微观结构的破坏使得减阻剂溶液的非牛顿特性变差,进而使得降低湍流耗散的能力变差,减阻剂的减阻能力下降。

也有部分研究人员展开了剪切对减阻性能的具体影响。廖子涵等[50]利用分散聚合法合成的减阻剂耐剪切速率为10 000 s^{-1},当剪切速率超过这个值后,分子链受到影响会发生降解行为,此时随着剪切速率的进一步增加减阻率开始减小,特别是剪切速率超过20 000 s^{-1}后减阻率的下降趋势十分明显。肖博等[51]对阴离子型减阻剂XT-65B进行了室内评价,发现该减阻剂的减阻率随着剪切速率的增大缓慢减小,当剪切速率增大到高于4 000 s^{-1}时,减阻率大小还能稳定在50%左右。

剪切时间对减阻剂的减阻性能也有一定的影响。张锋三等[52]优化合成了一种白色乳液压裂液减阻剂,并研究了其减阻率和剪切时间之间的对应关系,发现在流速为10 m/s时,减阻率随着剪切时间的增加先基本保持不变,当剪切时间增加到超过150 s后,随着剪切时间的继续增加减阻率会相应变小。刘庆旺等[53]研究表明,随着剪切时间的增加,其配制的质量分数都为0.05%的部分水解阴离子型聚丙烯酰胺溶液(HPAM)和部分水解水溶性疏水缔合聚丙烯酰胺溶液(HAWSP)的减阻率有不同的变化规律,前者随着剪切时间的增加,减阻率逐渐下降,剪切时间达到500 s后减阻率已经下降到了30%左右,而后者随剪切时间的逐渐增加,减阻率先基本保持稳定,300 s后才有下降的趋势,剪切时间超过500 s后对应的减阻率还维持在65%以上。

随着剪切速率的进一步增加,减阻率会出现下降的情况,这是由于当剪切速率过高时,聚合物减阻剂的分子链容易出现剪切降解的现象,这使得减阻率的表观黏度下降,进而导致减阻剂对应的减阻率下降,因此在超过一定的剪切速率时,减阻剂的减阻效果会变差。

3.3 温度对减阻性能的影响

赵明伟等[54]以在实验室合成的水包水型聚合物减阻剂为研究对象,发现在排量一样的情况下,随着温度的逐渐升高,减阻剂对应的减阻率逐渐降低。杜凯等[55]研究了接枝共聚型页岩气压裂用减阻剂的减阻率在温度区间为20~90 ℃时的变化情况,发现当剪切速率固定在4 000 s^{-1}时,随着温度的升高减阻率逐渐降低,20 ℃时减阻率为60.1%,而90 ℃时减阻率降低到了54.4%。

随着深层页岩气等开发规模的逐渐增大,减阻剂的耐高温性能也需要得到提升,进而满足现场施工的需求。姚奕明等[56]通过丙烯酰胺、丙烯酸(AA)和十七烷基阳离子不饱和单体合成了一种耐高温并且有着优异减阻性能的减阻剂,这种减阻剂在丁山构造的一口水平井中得到了成功应用,在地层温度为143 ℃的情况下,现场施工减阻率高达82%。

分析认为,当温度过高时,会导致分子链受到影响,降解速度变快发生断裂的现象,这会使得聚合物的表观黏度也因此下降,对湍流漩涡的抑制能力变弱,进而使得减阻剂的减阻率变小。

3.4 矿化度对减阻性能的影响

矿化度过高,在湍流的情况下,会使得聚合物分子链的伸展难度增加,导致减阻剂的减阻率变小,因此为了提高储层的增产改造效果,有必要提升减阻剂的耐盐性能。

何静等[57]制备得到减阻剂DGSA-1在用量为1%时,随着$CaCl_2$的用量从0增加到10%,减阻剂水溶液对应的减阻率都稳定在70%左右,变化幅度很小。郭钢等[58]以质量浓度为0.7 g/L的TF减阻剂为主剂合成的滑溜水压裂液体系为研究对象,研究了在室温条件下矿化度对减阻率的影响,研究发现当矿化度从0 mg/L逐渐增加到5×10^4 mg/L时,虽然对应的减阻率总体上是减小的趋势,但是减小程度并不明显。熊颖等[59]研发了一种阴离子聚丙烯酰胺减阻剂,在矿化度为5×10^4~10×10^4 mg/L

区间范围内变动时,随着矿化度的逐渐增加,虽然减阻剂的减阻率整体上呈逐渐下降的趋势,但是下降幅度很小,减阻率可以稳定在73%左右。

3.5　分子结构对减阻性能的影响

分子结构是对减阻剂的减阻性能决定性作用的一个因素,可以从分子链的几何形状、分子链的化学组成来分析分子结构对减阻性能的影响。

马国艳等[60]制备得到水溶性减阻剂WDRA-M分子链较长且柔顺性比较好,在水溶液中容易舒展,并通过粒径分析发现WDRA-M乳液分布比较窄,而且平均粒径相对较小,这些特点使得该减阻剂的减阻性能良好。陈昊等[10]认为支链结构对于聚合物类减阻剂的减阻性能有一定影响,高分子主链上接上数量较少的长支链会提高减阻剂的减阻率,而接上短的支链则会降低减阻剂的减阻率。李永飞等[18]对比了几种典型的减阻剂对应的减阻性能,认为分子链结构为螺旋形且分子链的柔性较强的减阻剂对应的减阻性能更加优异和稳定。

4　减阻剂在非常规油气开发中的应用

刘宽等[61]针对目前常用的一些减阻剂存在耐盐性较差的问题合成了一种疏水缔合聚合物减阻剂GAF-RP,并成功应用于吉林某油田的压裂施工中,日产油为4.3 t,减阻率达到78.2%,具有优良的耐盐和减阻性能。

赵玉东[62]针对当前部分减阻剂存在对储层伤害性较大的问题,采用反相微乳液法制备了一种减阻剂CMT-10,并在陆上页岩区块A1井压裂中成功应用,该减阻剂具有低伤害特性,现场应用中减阻率达到62.5%~70.3%,对压裂施工效率有明显提升。

孟强等[63]利用反相乳液聚合法制备出一种新型减阻剂HDR-C,并在四川盆地页岩气区块M-1井的压裂施工中成功应用,该减阻剂对目标区块页岩储层的岩心伤害程度较小,伤害率为8.17%,减阻效果良好,减阻率的大小整体稳定在65%左右,同时压裂液的返排率达到了50%左右。

周东魁等[64]着重考虑了在开发页岩气时压裂液返排的利用率问题,研制出了以减阻剂JHFR为核心的新型滑溜水压裂液体系,这种新型滑溜水压裂液体系可以实现返排液的完全循环利用,在长宁H7平台3个井压裂施工的应用中减阻率都达到了70%左右,具有稳定高效的减阻效果。

吴琼等[65]以聚合物类减阻剂GZJ-3为主剂合成了一种新型滑溜水压裂液体系,这种新型压裂液体系具有良好的储层保护作用,对人造岩心和天然岩心的平均伤害率分别为5.62%和8.01%,将该滑溜水压裂液体系应用于陆上某页岩气区块B1井的压裂施工中,减阻率高达71.2%,有效降低了施工摩阻,提高了压裂施工效果。

5　减阻剂目前存在的主要问题

(1)聚合物类减阻,如胍胶和黄原胶等天然聚合物减阻剂的减阻性能并不突出,同时它的不溶物含量较高,对地层的伤害性较大。传统的聚丙烯酰胺类减阻剂虽然在减阻性能上有明显提升,但是耐盐、耐剪切等性能较差,在更加苛刻的储层环境下容易失效。

(2)就表面活性剂类减阻剂而言,它的耐剪切性相对于聚合物减阻剂来说有一定提升,但部分表面活性剂减阻剂存在和滑溜水压裂液体系中的其他添加剂配伍性差的问题,另外,只有加大用量才能使表面活性剂减阻剂充分发挥减阻作用,这大大增加了成本。

(3)纳米复合减阻剂虽然具有很大的发展潜力,但也存在一些问题,首先是多数纳米材料的成本过高,再者虽然纳米材料种类很多,但相关研究主要集中在SiO_2、TiO_2等这些常规的纳米材料上,研究范围太窄,数据收集存在局限性。

(4)整体来说,聚合物类减阻剂、表面活性剂类减阻剂和纳米材料复合减阻剂的减阻机理都没有一个比较系统的减阻机理解释,很多关于减阻机理的解释学说都存在很大的局限性,这严重制约着减阻剂综合性能的提升和现场应用。

6　展望

基于目前阶段减阻剂存在的主要问题以及非常规储层复杂压裂环境的需要,具有独特物化特性的纳米材料有很大的发展空间,由于其存在成本过高的问题,制备低成本、稳定性好、减阻性能优异和对储层伤害程度小的多功能型纳米复合减阻剂将是未来研究的重点,未来减阻剂和以减阻剂为核心的滑溜水压裂液体系的发展方向具体可以从以下几点出发考虑。

(1)建立数学模型方程并通过计算机模拟软件进行模拟,深入探究减阻剂的减阻机理,形成一套统一的对减阻剂的减阻现象进行系统解释的理论体系,这有利于减阻剂性能的优化提升。

(2)加快相对廉价的原材料开发进度,优化纳米材料的制作成本,进而使得纳米复合减阻剂的制备成本能够有效降低,提升自身的现场应用价值。

(3)建立一套科学的室内合成减阻剂的方法以及能够对减阻剂现场应用效果进行科学评价的标准准则,促进减阻剂的工业化生产。

(4)滑溜水压裂液由于黏度较低、携砂能力差的问题而需要大排量、大液量注入,这增加了施工成本,因此在保证减阻效果的前提下,黏度可调整滑溜水压裂液体系可以是今后的一个重点发展方向。

(5)压裂施工后返排率较低会使得储层受到污染,大幅降低油气资源的整体产量,有必要加大力度开发一套甚至多套能够有效返排率的新技术,同时可以将智能型纳米颗粒比如纳米磁流体应用到滑溜水压裂液体系中,由于这种颗粒可以受到外界物理场控制,响应外界刺激循环利用,在节约生产成本上有着很大的优势。

参 考 文 献

[1] 王欣, 才博, 李帅, 等. 中国石油油气藏储层改造技术历程与展望[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 67-75.
Wang Xin, Cai Bo, Li Shuai, et al. Process and prospect of reservoir reconstruction technology for petroleum reservoirs in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(1): 67-75.

[2] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 638-648.
Song Yan, Li Zhuo, Jiang Zhenxue, et al. Research progress and development trend of unconventional oil and gas geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 638-648.

[3] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.

[4] 赵金洲, 任岚, 蒋廷学, 等. 中国页岩气压裂十年:回顾与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 121-142.
Zhao Jinzhou, Ren Lan, Jiang Tingxue, et al. Shale gas fracturing in China over the past decade: review and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 121-142.

[5] 周洪涛, 宋宗效, 邱晓慧, 等. 高黏减阻剂的研究与应用进展[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(3): 341-347.
Zhou Hongtao, Song Zongxiao, Qiu Xiaohui, et al. Research and application progress of high viscosity drag reducer[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(3): 341-347.

[6] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.
Jia Chengzao. On the breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical oil and gas geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.

[7] 蒋其辉, 杨向同, 于筱溪, 等. 国内外滑溜水减阻剂研究进展[J]. 化学工业与工程, 2022, 39(2): 76-83.
Jiang Qihui, Yang Xiangtong, Yu Xiaoxi, et al. Research progress of drag reducing agents for slippery water at home and abroad[J]. Chemical Industry and Engineering, 2022, 39(2): 76-83.

[8] 李玉敏, 李嘉, 赵伟, 等. 一体化多功能减阻剂的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(1): 146-152.
Li Yumin, Li Jia, Zhao Wei, et al. Research and application of integrated multifunctional drag reducer[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(1): 146-152.

[9] 郭建春, 李杨, 王世彬. 滑溜水在页岩储集层的吸附伤害及控制措施[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 320-325.
Guo Jianchun, Li Yang, Wang Shibin. Adsorption damage of slippery water in shale reservoirs and its control measures[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 320-325.

[10] 陈昊, 毕凯琳, 张军, 等. 非常规油气开采压裂用减阻剂研究进展[J]. 油田化学, 2021, 38(2): 347-359.
Chen Hao, Bi Kailin, Zhang Jun, et al. Research progress of drag reduction agents for unconventional oil and gas exploitation and fracturing[J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(2): 347-359.

[11] 张汝生, 张鹏, 田尧, 等. 耐温抗盐耐剪切型滑溜水降阻剂的制备探讨[J]. 应用化工, 2018, 47(4): 834-838, 845.
Zhang Rusheng, Zhang Peng, Tian Yao, et al. Study on preparation of thermal, salt and shear resistance reducing agent of slippery water[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(4): 834-838, 845.

[12] 丁飞, 戴彩丽, 孙永鹏, 等. 耐温型聚丙烯酰胺减阻剂研究与应用现状[J]. 石油化工, 2022, 51(12): 1502-1507.
Ding Fei, Dai Caili, Sun Yongpeng, et al. Research and application status of temperature resistant polyacrylamide drag reducer[J]. Petrochemical Technology, 2022, 51(12): 1502-1507.

[13] Sharma R, Kaith B S, Kalia S, et al. Biodegradable and conducting hydrogels based on Guar gum polysaccharide for antibacterial and dye removal applications[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 162: 37-45.

[14] 张春雨, 吴家全, 王桂珠, 等. 胍胶降阻特性及机理研究[J]. 应用化工, 2020, 49(1): 63-66.
Zhang Chunyu, Wu Jiaquan, Wang Guizhu, et al. Study on resistance reduction properties and mechanism of guanidine gum[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 49(1): 63-66.

[15] Mohammadtabar M, Sanders R S, Ghaemi S. Viscoelastic properties of flexible and rigid polymers for turbulent drag reduction[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2020, 283: 104347.

[16] Hong C H, Choi H J, Zhang K, et al. Effect of salt on turbulent drag reduction of xanthan gum[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 342-347.

[17] 禹燕飞, 李明义, 赵文斌, 等. 不同直径光滑圆管中黄原胶溶液流动减阻特性的实验研究[J]. 实验流体力学, 2014, 28(5): 18-23.
Yu Yanfei, Li Mingyi, Zhao WenBin, et al. Experimental study on flow drag reduction characteristics of xanthine gum solution in smooth circular tubes with different diameters[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(5): 18-23.

[18] 李永飞, 王彦玲, 曹勋臣, 等. 页岩储层压裂用减阻剂的研究及应用进展[J]. 精细化工, 2018, 35(1): 1-9.
Li Yongfei, Wang Yanling, Cao Xunchen, et al. Research and application progress of drag reduction agents for fracturing shale reservoir[J]. Fine Chemicals, 2018, 35(1): 1-9.

[19] 安杰, 刘涛, 范华波, 等. 鄂尔多斯盆地致密油滑溜水压裂液的研究与应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 541-544.
An Jie, Liu Tao, Fan Huabo, et al. Research and application of tight oil slick water fracturing fluid in Ordos Basin[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 541-544.

[20] 李楚航, 乔孟占, 陈东, 等. 连续混配耐盐型压裂液的性能评价[J]. 精细石油化工, 2023, 40(4): 18-22.
Li Chuhang, Qiao Mengzhan, Chen Dong, et al. Performance evaluation of continuously mixed salt-resistant fracturing fluids[J]. Speciality Petrochemicals, 2023, 40(4): 18-22.

[21] 成育红, 李鑫, 曹朋亮, 等. 深层致密砂岩储层聚合物减阻剂的研究及应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(5): 134-138.
Cheng Yuhong, Li Xin, Cao Pengliang, et al. Research and application of polymer drag reducer in deep tight sandstone reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(5): 134-138.

[22] 崔强, 张金功, 薛涛. 疏水缔合聚合物减阻剂的合成及流变性能[J]. 精细化工, 2018, 35(1): 149-157.
Cui Qiang, Zhang Jingong, Xue Tao. Synthesis and rheological properties of drag reduction agents for hydrophobic association polymers[J]. Fine Chemicals, 2018, 35(1): 149-157.

[23] Liu F, Xu K, Qin W, et al. Preparation of two-component polyacrylamide inverse emulsion drag reducer for slick water and investigation of its rheological and drag reduction properties[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 224: 211632.

[24] 刘晓瑞, 刘利锋, 傅鹏, 等. 抗盐速溶型减阻剂的制备及性能评价[J]. 精细石油化工, 2022, 39(4): 31-35.
Liu Xiaorui, Liu Lifeng, Fu Peng, et al. Preparation and performance evaluation of salt-resistant instant drag reducer[J]. Speciality Petrochemicals, 2022, 39(4): 31-35.

[25] 杨旭, 赖小娟, 段国栋, 等. 耐盐缓速性酸液减阻剂 GnR-1 的研制[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 164-167, 172.
Yang Xu, Lai Xiaojuan, Duan Guodong, et al. Development of GnR-1 drag reducer for salt-resistant slow acid solution[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 40(12): 164-167, 172.

[26] 吴越. 可降解微交联减阻剂的开发及应用[J]. 石油化工, 2023, 52(5): 708-713.
Wu Yue. Development and application of biodegradable microcrosslinked drag reducer [J]. Petrochemical Technology, 2023, 52(5): 708-713.

[27] Abdulbari H A, Amir R. Drag reduction performance and stability of an organic polymer, surfactant, and their complexes [J]. Chemical Engineering & Technology, 2021, 44(12): 2333-2340.

[28] 刘倩, 管保山, 刘玉婷, 等. 滑溜水压裂液用降阻剂的研究与应用进展[J]. 油田化学, 2020, 37(3): 545-551.
Liu Qian, Guan Baoshan, Liu Yuting, et al. Research and application progress of drag reduction agents for slippery water fracturing fluids[J]. Oilfield Chemistry, 20, 37(3): 545-551.

[29] Rodrigues R K, Silva L A S, Vargas G G, et al. Drag reduction by wormlike micelles of a biodegradable and non-biodegradable surfactants[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2020, 23(1): 21-40.

[30] 刘青山, 毛金成. 滑溜水减阻剂耐盐机理及研究进展[J]. 能源化工, 2022, 43(3): 9-14.
Liu Qingshan, Mao Jincheng. Salt resistance mechanism and research progress of drag reducing agents for slippery water[J]. Energy Chemical Industry, 2022, 43(3): 9-14.

[31] 李恩田, 吉庆丰, 王丰海, 等. 两性表面活性剂的湍流减阻性能与流场分析[J]. 中国科技论文, 2020, 15(4): 444-448.
Li Entian, Ji Qingfeng, Wang Fenghai, et al. Turbulent drag reduction performance and flow field analysis of amphoteric surfactants[J]. China Sciencepaper, 2019, 15(4): 444-448.

[32] Tamano S, Kitao T, Morinishi Y. Turbulent drag reduction of boundary layer flow with non-ionic surfactant injection[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 749: 367-403.

[33] 袁颖, 敬加强, 尹然, 等. 阳离子型表面活性剂与聚合物复配体系协同减阻作用[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2593-2603.
Yuan Ying, Jing Jiaqiang, Yin Ran, et al. Synergistic drag reduction effect of cationic surfactant and polymer complex system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(5): 2593-2603.

[34] 王青会, 刘冬洁, 魏进家. 阳离子型表面活性剂与非离子型聚合物相互作用减阻研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 26-32.
Wang Qinghui, Liu Dongjie, Wei Jinjia. Study on drag reduction of interaction between cationic surfactant and non-ionic polymer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 26-32.

[35] Liu D, Wang Q, Wei J. Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 132: 460-469.

[36] Esfandiari N, Zareinezhad R, Habibi Z. The investigation and optimization of drag reduction in turbulent flow of Newtonian fluid passing through horizontal pipelines using functionalized magnetic nanophotocatalysts and lecithin[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(1): 63-75.

[37] 余维初, 吴军, 韩宝航. 页岩气开发用绿色清洁纳米复合减阻剂合成与应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(8): 78-82, 7.
Yu Weichu, Wu Jun, Han Baohang. Synthesis and application of green clean nano-composite drag reducer for shale gas development[J]. Journal of Yangtze University (Science Edition), 2015, 12(8): 78-82, 7.

[38] Pakzad H, Liravi M, Moosavi A, et al. Fabrication of durable superhydrophobic surfaces using PDMS and beeswax for drag reduction of internal turbulent flow [J]. Applied Surface Science, 2020, 513: 145754.

[39] 秦文龙, 李璐, 李国庆,等. 耐盐性 PAM-AMPS/Fe_3O_4 纳米减阻剂流变性[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(1): 137-145.
Qin Wenlong, Li Lu, Li Guoqing, et al. Rheology of salt-resistant PAM-AMPS/Fe_3O_4 nano-drag reducer[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2024, 40(1): 137-145.

[40] 樊帆, 周福建, 刘致屿, 等. 圆管中聚合物减阻剂的减阻机理研究与评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2020, 33(2): 28-33.
Fan Fan, Zhou Fujian, Liu Zhiyu, et al. Research and evaluation on drag reduction mechanism of polymer drag reducer in circular tube[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2020, 33(2): 28-33.

[41] 司晓冬, 罗明良, 李明忠, 等. 油气田开发中湍流减阻剂及其

应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1607-1612.
Si Xiaodong, Luo Mingliang, Li Mingzhong, et al. Research progress of turbulence drag reducer and its application in oil and gas field development[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1607-1612.

[42] Liu Z, Zhou F, Qu H, et al. Impact of the microstructure of polymer drag reducer on slick-water fracturing[J]. Geofluids, 2017(1): 1-8.

[43] 刘晓瑞, 周福建, 石华强, 等. 聚合物减阻剂微观减阻机理研究[J]. 石油化工, 2017, 46(1): 97-102.
Liu Xiaorui, Zhou Fujian, Shi Huaqiang, et al. Study on micro drag reduction mechanism of polymer drag Reducer[J]. Petrochemical Technology, 2017, 46(1): 97-102.

[44] Xu K, Lu Y, Chang J, et al. Progress of development and application of drag reduction agents for slick-water fracturing[C]// Journal of Physics: Conference Series. Bristol: IOP Publishing, 2021, 2097(1): 012022.

[45] 司晓冬, 罗明良, 李明忠, 等. 压裂用减阻剂及其减阻机理研究进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 732-739.
Si Xiaodong, Luo Mingliang, Li Mingzhong, et al. Research progress of drag reducer used in fracturing and its mechanism[J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4): 732-739.

[46] 徐婷婷, 刘平礼, 陆丽, 等. 一种压裂用滑溜水阳离子疏水缔合聚合物减阻剂的合成与评价[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 94-96, 107, 7.
Xu Tingting, Liu Pingli, Lu Li, et al. Synthesis and evaluation of a drag reducer for slickwater cationic hydrophobic association polymer used in fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 43(3): 94-96, 107, 7.

[47] 杨霖, 梁兵. 长链端基疏水缔合减阻剂的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2022, 39(3): 498-503.
Yang Lin, Liang Bing. Preparation and performance evaluation of long chain end group hydrophobic association drag reducer[J]. Oilfield Chemistry, 2022, 39(3): 498-503.

[48] Jing X, Huang C, Fu Z. Synthesis and performance evaluation of a new drag reducer-cationic hybrid polymeric based on polyacrylamide[J]. Journal of Polymer Research, 2021, 28(11): 435.

[49] Liu Z, Tian Z, Yuan H, et al. Effect of shear flow on drag reducer performance and its microscopic working mechanism[J]. Processes, 2022, 10(8): 1485.

[50] 廖子涵, 陈馥, 卜涛, 等. 水包水乳液减阻剂的减阻机理研究[J]. 石油化工, 2019, 48(7): 724-730.
Liao Zihan, Chen Fu, Bu Tao, et al. Study on drag reduction mechanism of water-in-water emulsion drag reducer[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(7): 724-730.

[51] 肖博, 张士诚, 张劲, 等. 新型纳米复合纤维基清水压裂液体系配方优化与评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(14): 175-180.
Xiao Bo, Zhang Shicheng, Zhang Jin, et al. Formulation optimization and evaluation of novel nanocomposite fiber wikis for water fracturing fluids[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(14): 175-180.

[52] 张锋三, 沈一丁, 王磊, 等. 聚丙烯酰胺压裂液减阻剂的合成及性能[J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3640-3644.
Zhang Fengsan, Shen Yiding, Wang Lei, et al. Synthesis and properties of drag reducer for polyacrylamide fracturing fluid[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(11): 3640-3644.

[53] 刘庆旺, 郭昊, 范振忠, 等. 疏水缔合减阻剂的分子模拟[J]. 现代化工, 2019, 39(5): 220-223, 225.
Liu Qingwang, Guo Hao, Fan Zhenzhong, et al. Molecular simulation of hydrophobic association drag reducer[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(5): 220-223, 225.

[54] 赵明伟, 闫若勤, 李阳, 等. 滑溜水压裂液减阻剂减阻性能评价综合性实验设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 66-69, 76.
Zhao Mingwei, Yan Ruoqin, Li Yang, et al. Comprehensive experimental design for drag reduction performance evaluation of slick-water fracturing fluid drag reducer[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(4): 66-69, 76.

[55] 杜凯, 林蔚然, 祝纶宇, 等. 生物基反相乳液型降阻剂与滑溜水体系的研发与评价[J]. 化工新型材料, 2015, 43(5): 215-217.
Du Kai, Lin Weiran, Zhu Lunyu, et al. Development and evaluation of bio-based reversed-phase emulsion resistance reducing agent and slippery water system[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(5): 215-217.

[56] 姚奕明, 魏娟明, 杜涛, 等. 深层页岩气压裂滑溜水技术研究与应用[J]. 精细石油化工, 2019, 36(4): 15-19.
Yao Yiming, Wei Juanming, Du Tao, et al. Research and application of slippery water technology for deep shale gas fracturing[J]. Speciality Petrochemicals, 2019, 36(4): 15-19.

[57] 何静, 王满学, 吴金桥, 等. 多功能滑溜水减阻剂的制备及性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 48-52.
He Jing, Wang Manxue, Wu Jinqiao, et al. Preparation and performance evaluation of multifunctional drag reducer for slippery water[J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(1): 48-52.

[58] 郭钢, 薛小佳, 吴江, 等. 新型致密油藏可回收滑溜水压裂液的研发与应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(2): 98-104.
Guo Gang, Xue Xiaojia, Wu Jiang, et al. Development and application of a new type of recoverable slick water fracturing fluid in tight reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2017, 32(2): 98-104.

[59] 熊颖, 刘友权, 梅志宏, 等. 四川页岩气开发用耐高矿化度滑溜水技术研究[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(3): 62-65, 71.
Xiong Ying, Liu Youquan, Mei Zhihong, et al. Research on high-salinity resistance slippery water technology for shale gas development in Sichuan[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(3): 62-65, 71.

[60] 马国艳, 沈一丁, 李楷, 等. 滑溜水压裂液用聚合物减阻剂性能[J]. 精细化工, 2016, 33(11): 1295-1300.
Ma Guoyan, Shen Yiding, Li Kai, et al. Properties of polymer drag reducer for slippery water fracturing fluid[J]. Fine Chemicals, 2016, 33(11): 1295-1300.

[61] 刘宽, 罗平亚, 丁小惠, 等. 抗盐型滑溜水减阻剂的性能评价[J]. 油田化学, 2017, 34(3): 444-448.

Liu Kuan, Luo Pingya, Ding Xiaohui, et al. Evaluation of salt-resistant slip-water drag reducer[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(3): 444-448.

[62] 赵玉东. 低伤害高效清洁滑溜水压裂液体系研制与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 65-71.
Zhao Yudong. Development and application of low damage and high efficiency clean slick water fracturing fluid system[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 65-71.

[63] 孟强, 范锦锋, 艾生军, 等. 新型高效减阻剂研究及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 97-100, 12.
Meng Qiang, Fan Jinfeng, Ai Shengjun, et al. Research and application of new high-efficiency drag reducer[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 97-100, 12.

[64] 周东魁, 李宪文, 肖勇军, 等. 一种基于返排水的新型滑溜水压裂液体系[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 503-508.
Zhou Dongkui, Li Xianwen, Xiao Yongjun, et al. A new slickwater fracturing fluid system based on flowback drainage[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4): 503-508.

[65] 吴琼, 曹红燕, 黄敏, 等. 新型低伤害清洁减阻水压裂液体系研究及应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 94-97, 6-7.
Wu Qiong, Cao Hongyan, Huang Min, et al. Research and application of a new low-damage clean drag reducing water fracturing fluid system[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(6): 94-97, 6-7.